

能源强国目标下煤炭安全保供及高效降碳效力研究

葛世荣¹, 刘淑琴², 刘金昌^{2*}, 王兵³, 安小雅², 向玲²

(1. 中国矿业大学(北京)机械与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 3. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083)

摘要: 煤炭安全保供及高效降碳效力研究可为能源强国目标下煤炭领域发展规划提供有力的决策支撑。本文从安全保供和高效降碳两个角度入手, 研究了煤炭在能源强国目标下继续保持主体能源地位的潜力、能力和实力, 着重通过构建煤炭安全保供的系统动力学模型预测了煤炭安全保供的效力, 分析了2060年前煤炭领域的降碳效力。研究表明: 我国煤炭的可采储量和资源分布是安全保供的基本保障, 结合近20年煤炭供应和消费关系可知, 我国煤炭资源具备稳定、安全、坚实的保供能力; 未来煤炭的安全保供效力在波动中逐渐趋向于动态的柔性平衡; 传统煤炭能源向煤基能源过渡效力是构建能源强国目标下新型能源体系的重要环节。我国煤炭领域在清洁转化与利用中体现出显著的降碳潜力, 未来, 随着煤炭地下气化和富油煤开发利用等技术的发展应用, 将展现出较强的降碳效力, 至2060年, 总体的降碳效力约为 1×10^9 t。

关键词: 能源强国; 煤炭领域; 安全保供; 高效降碳; 效力预测

中图分类号: TD98 文献标识码: A

Effectiveness of Secure Supply and Carbon Reduction in the Coal Sector for Strengthening the Energy Power of China

Ge Shirong¹, Liu Shuqin², Liu Jinchang^{2*}, Wang Bing³, An Xiaoya², Xiang Ling²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
2. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
3. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Research on the effectiveness of coal stable supply and carbon reduction can provide robust decision-making support for the development planning of the coal sector. This study examines the potential, capacity, and resilience of coal to maintain its primary energy status, focusing on the secure supply and carbon reduction perspectives. A system dynamics model is constructed to predict the effectiveness of coal stable supply, and the carbon reduction effectiveness within the coal sector until 2060 is evaluated. The results indicate that the recoverable reserves and resource distribution of coal in China are basic guarantee for ensuring energy security. Based on the coal supply and consumption relationship in the past 20 years, it can be concluded that coal supply in China is stable and secure. In the future, the secure supply effectiveness of coal will gradually achieve a dynamic flexible balance with fluctuations. Transitioning from traditional coal-dominated energy to coal-based energy is crucial for establishing a new energy system. China's

收稿日期: 2024-03-06; 修回日期: 2024-04-08

通讯作者: *刘金昌, 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院副教授, 研究方向为煤炭清洁高效利用; E-mail: liujinchang@cumtb.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“推动能源强国建设战略研究”(2022-PP-03), “我国煤炭行业碳中和发展科学体系及战略路径研究”(2022-XBZD-09), “我国能源安全战略研究”(2022-JB-05), “我国能源高质量发展战略及前瞻性技术体系研究”(2023-JB-08)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

coal industry has shown significant potential for carbon emission reduction in processing and utilization, and will demonstrate strong carbon-reduction effectiveness through the development and application of technologies such as underground gasification of coal and development and utilization of oil-rich coal. By 2060, the overall carbon reduction effectiveness will reach approximately 1×10^9 t.

Keywords: energy power; coal sector; stable supply; carbon emission reduction; effectiveness estimation

一、前言

2021年,我国明确提出了深入推动能源革命,加快建设能源强国^[1]的要求,在相关政策的支持与引导下,能源强国的内涵、路径和举措也逐步明晰并有序实施。2022年,党的二十大报告提出,积极稳妥推进碳达峰、碳中和,立足我国能源资源禀赋,坚持先立后破,有计划分步实施碳达峰行动,这是我国正式提出能源强国的建设目标以及实现能源强国目标的基本措施^[2,3]。能源强国目标的实现需以清洁、高效、安全、低碳的新型能源体系为基础,短期聚焦能源安全,中长期关注低碳转型,在确保“能源的饭碗端在自己手里”的前提下,努力实现“双碳”战略目标^[4,5]。

建设能源强国,要立足我国的资源禀赋,在当前新能源发展规模尚未满足社会发展需要的背景下,完善多轮驱动的能源供应体系,科学把握清洁能源替代的节奏力度,不断增强能源供应的稳定性、安全性和可持续性。因此,在能源强国目标的实现过程中,保障能源供给安全稳定依然是首要任务,而建设安全稳定的能源供应链需要增强煤炭的生产供给弹性,实现产能快速变化下的安全高效生产。另外,我国能源强国的目标要求,煤炭在开发利用全过程中要实现绿色化、清洁化和低碳化,逐步实现煤炭全产业链的碳中和。煤炭是能源消费降碳的主力军,煤炭开发利用过程中产生的碳排放约占全国碳排放总量的60%~70%,是我国完成碳减排任务的关键所在。为此,迫切需要突破煤炭能源清洁化利用关键技术,在特定条件下实现煤炭开发利用全流程清洁低碳,为破解煤炭适应新型能源体系建设要求下的发展难题提供近零排放保障,支撑我国能源自主安全可控和经济平稳运行。能源强国目标下的煤炭清洁高效利用需要实现煤炭利用和上下游环节的深度脱碳,并与其他零碳/负碳技术耦合发展,形成煤基能源供给侧与需求侧集成优化且低碳、零碳、负碳利用格局。

鉴于我国能源资源禀赋和经济社会发展所处阶

段,未来我国煤炭消费量占比将会下降,但是在能源体系中的“压舱石”“稳定器”作用会更加凸显。煤炭资源约占我国已探明化石能源资源总量的96%,在今后相当长的时期内,煤炭仍将在能源安全兜底保障、降碳等方面发挥重要作用^[6,7]。因此,明确煤炭的安全保供和降碳效力,对我国实现能源强国的建设目标具有重要意义。2023年,我国煤炭消费在一次能源消费总量中的占比为55.3%^[8]。总体来看,煤炭在我国能源结构调整中发挥的作用具有明显的自主特色^[9],煤炭安全保供及降碳效力的实现无法直接借鉴其他国家发展经验,需要立足基本国情、资源禀赋和能源结构进行针对性研究。

立足能源强国目标下的煤炭安全保供,本文剖析煤炭安全保供的内涵,运用系统动力学模型研究煤炭的保供效力,分析煤炭高效降碳效力,以期为能源强国目标下煤炭领域的发展规划提供决策支撑。

二、能源强国目标下煤炭安全保供的内涵

(一) 煤炭安全保供潜力

《中国矿产资源报告(2023)》中的数据显示,2022年,我国煤炭剩余探明技术可采储量为 2.07×10^{11} t^[10]。其中,西部地区是我国煤炭资源储量最为丰富的区域,可采储量占全国总储量的66%;中部地区煤炭可采储量占全国总储量的28.5%;东部和东北地区合计约占5.5%。我国煤炭资源主要分布在山西、内蒙古、新疆、陕西、贵州等省份,是我国的主要产煤区域^[11],而煤炭的消费主体主要集中在东部和南部地区,客观上决定了我国“北煤南运、西煤东调”的基本格局^[12]。

我国可用于制油、制气的煤炭资源保供潜力巨大。根据预测,我国气化用煤保有资源储量达 8.789×10^{11} t,主要分布在山西、内蒙古、新疆等省份;液化用煤保有资源量为 3.009×10^{11} t,主要分布于山西、内蒙古、陕西等省份;而我国富油煤的保有资源量约为 1.342×10^{12} t,主要分布于陕西、内蒙古、宁夏、新疆和甘肃等省份^[13]。我国煤炭安全保

供潜力巨大,并且已形成了煤电、煤制油、煤制气、煤制化学品等多种清洁能源互补的保供体系。

(二) 煤炭安全保供能力

“十四五”时期,我国大型煤炭基地的规划有效产量共计为 4×10^9 t/a,比“十三五”时期增加了 2.5×10^9 t/a;我国主要煤炭基地的规划有效产量及所起的保供作用如图1所示。其中,蒙东、云贵煤炭基地的煤炭规划有效产量共计为 7.5×10^8 t/a,在稳定规模、安全生产的基础上发挥着区域保障的保供作用;冀中、鲁西、两淮、河南等煤炭基地的煤炭规划有效产量共计为 4.3×10^8 t/a,以控制规模、提升水平为基本要求,发挥着基本保障的保供作用;晋北、晋中、晋东、神东、陕北、黄陇等煤炭基地的煤炭规划有效产量共计为 2.44×10^9 t/a,以实行控制节奏、高产高效为原则,为全国煤炭资源保供发挥兜底保障的作用;新疆煤炭基地的煤炭规划产量将稳定在 3×10^8 t/a,坚持科学规划、把握节奏,发挥应急保障的保供作用;宁东煤炭基地的煤炭规划产量维持在 8×10^7 t/a,发挥区内平衡的保供作用,以实现稳定规模、就地转化的基本目标^[14]。总的来看,我国煤炭领域尤其是各大型煤炭基地具备稳定、安全、坚实的保供能力。

(三) 煤炭安全保供实力

2000—2022年,我国煤炭供应量总体呈上升趋势(见图2)。2000年以来,我国煤炭整体维持了供

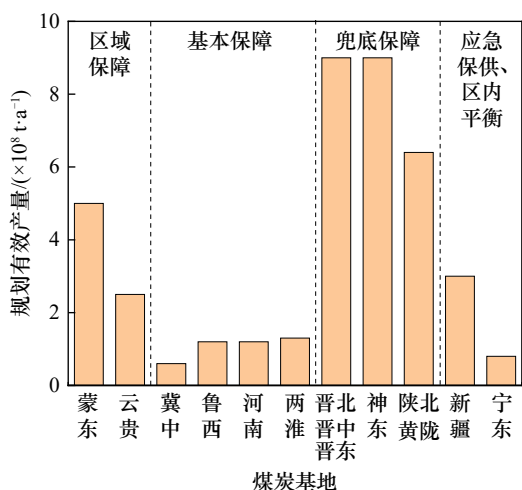


图1 “十四五”时期我国大型煤炭基地规划有效产量及保供作用

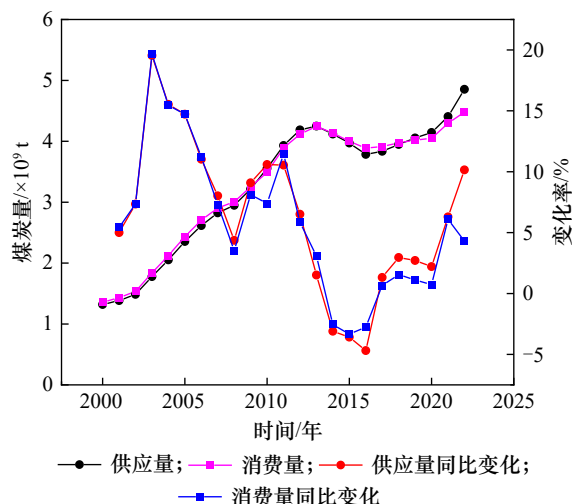


图2 2000—2022年我国煤炭供应量、消费量及其同比变化情况

求关系平衡,供应量与消费量的平均比重为99.66%,这也展示出我国煤炭领域坚实的保供实力。未来一段时期内,我国用能需求将保持刚性增长,能源保供责任重大,资源禀赋凸显了煤炭的保供重任。我国能源安全面临煤炭消费高位运行的新局势,虽然煤炭在能源结构中的占比略有下降,但对煤炭的需求总量将呈现逐步上升的趋势。2022年,我国煤炭已探明的可采储量为 2.07×10^{11} t。按照煤炭地质核准资源可用率(45%~50%)与煤炭工作面采出率(85%~90%)计算,假设未来煤炭保供需求量有急速下降、线性下降和慢速下降3种情景,可以得出,我国煤炭可采年限区间为2075—2125年。因此,在当前煤炭可采储量不变的情况下,我国煤炭资源储量安全形势不容乐观,亟需开展新增勘探煤炭储量和深部煤炭勘探开发资源储量安全研究。煤炭资源可采年限是我国资源安全保供实力的重要体现,探索煤炭资源安全储量保障措施和增储路径,可为我国的能源安全发挥着资源兜底保障作用。

煤基能源是将煤炭原料创新转化为具有低碳清洁属性的煤基电、油、气、氢及化学品等新质能源,是低碳化的二次能源。煤基能源拓展了煤炭在能源供应端的角色范围,提高了我国在电、油、气、氢及化学品等方面立足自主资源的安全保供能力,同时煤系伴生资源一体化开发有望为我国关键矿产资源安全保障提供新思路和新路径。煤基能源体现了现代煤炭资源清洁低碳、安全高效的转化利用内涵,符合新型能源体系的发展理念,为保障我

的系统动力学模型流图。

(三) 系统动力学模型流图

在构建系统动力学模型时，设定：煤炭清洁利用技术指现有的主流煤炭转化技术和未来煤基能源颠覆性的转化技术，包括原位利用和地面利用，主要有煤电、煤制油、煤制气、煤制氢、煤炭地下气化、煤层气开发利用、富油煤开发利用、纳米碳氢燃料和流态化开采等技术；传统的合成氨、焦化、中低温热解等煤炭转化技术未纳入到清洁利用技术的范畴中；因我国煤炭资源自给率高，相关政策、能源强度、供应能力等需要因地制宜地考虑我国国情；对于碳封存与利用方面不局限于现有的技术和处理效率，按照实现“双碳”战略目标的基本要求

进行规划。在模型构建时，将不可控的国际能源形势、国际政治格局等作为外生变量处理，需要输入的变量有煤炭储量、供应能力、煤炭库存、能源价格、经济发展（以国内生产总值作为衡量指标）、相关政策、

清洁利用效率及碳封存与利用。利用系统动力学模型分析和预测不同发展情景下的煤炭保供效力，最终建立煤炭安全保供系统动力学流图（见图5）。

(四) 煤炭安全保供系统动力学模型预测计算

Vensim软件可通过弹性方法建立包括因果循环、存货与流图等在内相关的动态模型^[20]。本研究运用Vensim软件对我国煤炭安全保供系统动力学模型进行模拟计算。首先，以2013—2022年的实际数据为参照，确定模型建立的准确性，结果如图6所示。煤炭安全保供系统动力学模型模拟计算预测的2013—2022年的煤炭供应量和消费量与实际的供应量和消费量较为接近，误差在4%以内，结果的可信度较高。因此，本研究构建的煤炭安全保供系统动力学模型具有良好的准确性和适用性。

基于构建的煤炭安全保供系统动力学模型，经软件模拟计算得出2023—2060年我国的煤炭供应量和消费量，进而获得各年度的煤炭安全保供效力，结果如图7所示。

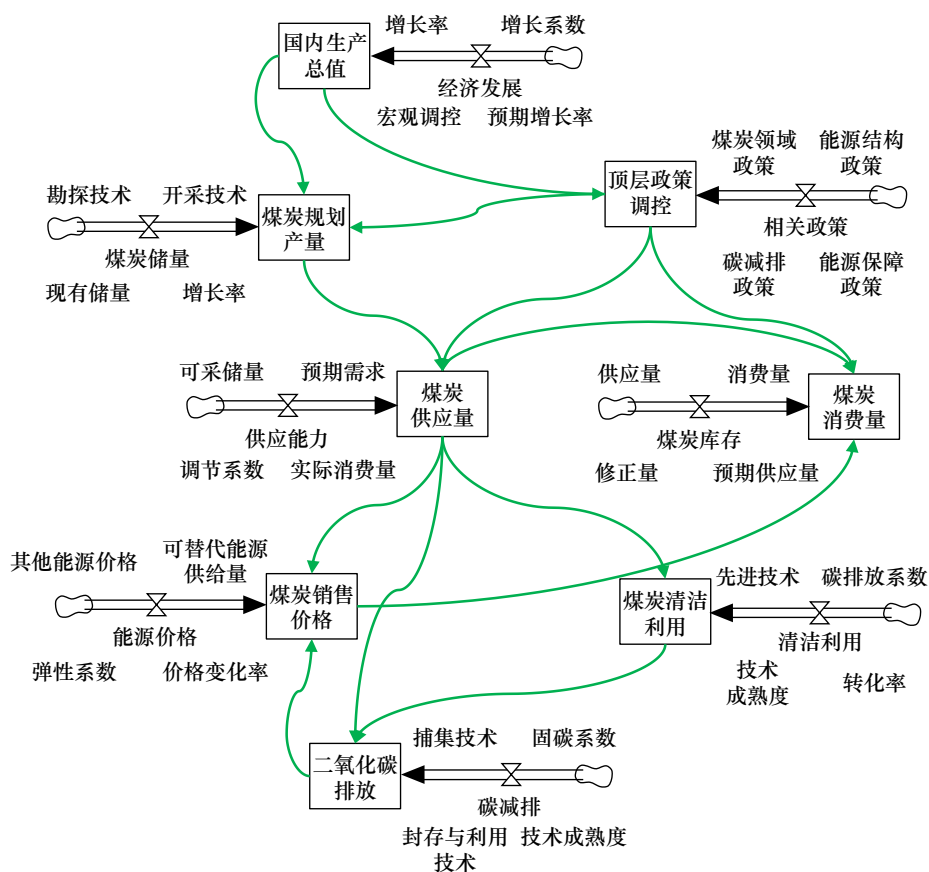


图5 煤炭安全保供系统动力学流图

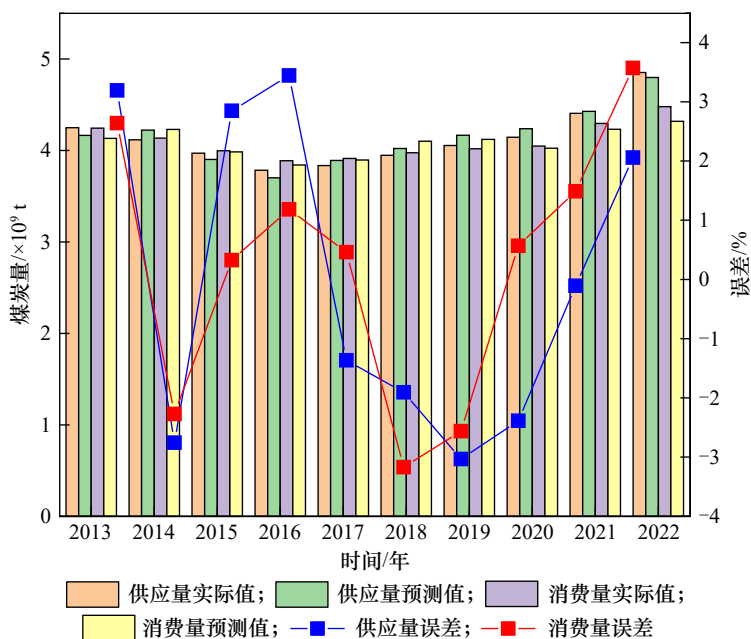


图6 煤炭安全保供系统动力学模型的预测值与实际值的对比

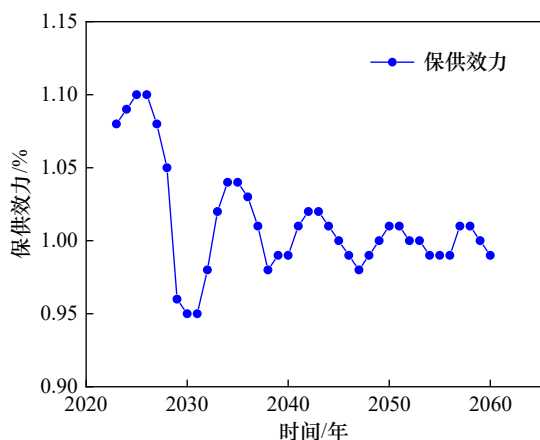


图7 煤炭安全保供系统动力学模型预测的保供效力

经模型预测，2023—2060年的煤炭安全保供效力情况具体如下。① 2023—2025年，我国煤炭的安全保供效力略微增长，这与经济快速发展、国际地缘形势变化所造成的能源供给格局改变相关。一方面，经济的快速发展需要能源作为支撑；另一方面，复杂的国际地缘形势在一定程度上影响了我国油、气等能源供应，需要煤炭发挥更大的能源安全“压舱石”作用。② 2026—2030年，随着各种波动带来的影响逐渐减缓，我国煤炭的安全保供效力将逐渐下降，回归到供需平衡的状态。2030年是我国实现“碳达峰”的收官时期，作为碳排放量较大的煤炭领域，将通过科学规划和政策引导，积极减少煤

炭在新能源可替代领域中的应用，推动煤炭开采、库存等工作更为深入、精准和细致，进而使煤炭安全保供效力在可控范围内略微下调。③ 2031—2035年，在新能源尚未可以大规模取代传统能源的情况下，随着经济发展的需要，煤炭安全保供效力将呈现小规模逐年上升。④ 2036—2060年，随着新能源技术的快速发展和推广应用，将在某些能源强度较低的领域实现对传统化石能源较为稳定的替代，使煤炭供应与消费之间更趋于平衡；同时，结合煤炭智能化、无人化、绿色化、原位化等新型开采技术的突破与应用，煤炭的安全保供效力逐渐趋向于平缓且更为科学、有序、弹性，实现供给与消费的动态平衡，进而在能源强国目标下实现煤炭资源的安全保供。

（五）煤炭能源过渡转型期的保供效力

在“双碳”战略目标的引导下，煤炭能源保供模式将从燃烧供给保供逐渐向煤基电、油、氢、气、化学品等复合多元的煤基能源保供转型。在极端气候及突发事件的影响下，煤基能源比煤炭能源具有更柔性的保供能力和降碳潜力。为明确煤炭能源向煤基能源过渡转型时期的保供效力，考虑煤基能源发展特征以及未来的相关政策，本研究以传统煤炭能源保供为基准情景，设计了3种过渡转型情景来模拟评估保供效力。

1. 急速过渡情景

随着更为严格的碳排放约束政策的推广实施,煤炭清洁高效利用技术水平的不断提高以及碳捕集、利用与封存规模的快速扩大,煤炭能源在短时期内向煤基能源急速过渡转型的条件均已成熟。在该情景下,煤基能源将在 2030 年替代 60% 的煤炭能源,在 2060 年达到替代 87% 的煤炭能源。

2. 柔性过渡情景

在能源转型背景下,煤基能源取代煤炭能源需要政策、技术和市场的共同作用。就目前而言,煤炭清洁高效利用,碳捕集、封存与利用等技术仍需要进一步提升及应用,在此情景下,煤基能源的取代速率将体现出柔性特征,预计 2030 年将替代 50% 的煤炭能源,2060 年替代 75% 的煤炭能源。

3. 缓慢过渡情景

结合突发事件对传统能源格局的影响、政策调整及技术发展遭遇的诸多壁垒等特殊情况来看,煤基能源对传统煤炭能源的取代速率会较为缓慢。在此情景下,2030 年煤基能源在过渡转型中的占比为 40%,2060 年则达到 60%。

以纯煤炭能源保供效力为基准,3 种过渡转型情景下的相对保供效力模拟计算结果如图 8 所示。① 在急速过渡情景下,相对保供效力在 2050 年前的波动均较为明显,主要是煤基能源对煤炭能源的急速取代存在政策、技术、市场等诸多因素的影响,需要做好各因素之间的协调与平衡。② 在柔性过渡情景下,2040 年前的相对保供效力呈现出振荡趋势,但振荡幅度和频率均比急速过渡情景小。从煤炭能源柔性过渡到煤基能源是在相关政策引导下

顺势而为的结果,将推动煤基能源相关技术不断进步、产业规模不断扩大,同时兼顾我国能源安全和碳减排效益。③ 在缓慢过渡情景下,2050 年前均呈现波动趋势,但波动幅度和频率较急速过渡情景偏小。因考虑到突发事件等情况对煤基能源发展与应用的影响,煤基能源对煤炭能源的替代速率放缓。在此情况下,煤基能源在短时期内无法充分发挥清洁转化和高效降碳的重要作用,致使新型能源体系建设步伐较慢、难以实现能源的自主可控,影响能源安全保供的根本底线。

四、能源强国目标下煤炭的降碳效力研究

(一) 高效降碳潜力

煤炭在开发及利用过程中的碳排放量占我国化石能源碳排放总量的 80% 以上,约占全国碳排放总量的 60%~70%^[21],是我国碳排放的主要来源,因而煤炭领域的高效降碳潜力显著。围绕煤电主体,在煤制油、煤制气、煤制氢三方面形成有力支撑,突破碳捕集、利用与封存技术,构建我国煤炭领域的全方位、全链条、全过程的高效降碳体系,具有重要意义。

煤基能源改变了煤炭直接燃烧的利用方式,是实现低碳乃至零碳排放的二次能源化方式,为煤炭能源系统实现动态碳中和提供了减碳新路径。现代煤基能源技术体系在未来新型能源体系中将发挥“一主体、三支撑、一突破”的重要作用,即“以煤稳电”的主体作用,“以煤增油”“以煤补气”“以煤助氢”的支撑作用,“矿区固碳”的重大突破。未来,规模化利用现代煤基能源替代传统的煤炭能源,既能发挥低碳化新质能源的安全保障作用,也能发挥对可再生能源稳健发展的协同支撑作用^[15]。

构建煤基能源多元技术路径,为厘清煤炭开发利用过程中的碳排放规律和碳减排潜力提供了开展定量研究的思路,是煤炭领域的高效降碳的基础。煤基能源多元技术路径谱图如图 9 所示。煤基能源多元技术路径是以煤炭开发环节的智能化、绿色化、低碳化和清洁化为基础,以煤炭资源转化为电、油、气、氢、化学品、材料等清洁能源和关键原料为核心,在保障能源安全和实现能源强国目标的驱动下,构建清洁低碳、安全高效、使煤从单一燃料转向燃料与原料并重的能源结构体系^[22-24]。煤

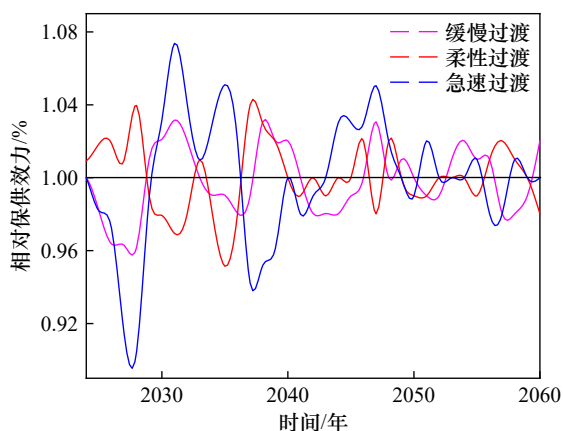


图8 不同情景模式下煤炭能源的保供效力

炭开发利用与其他技术集成化应用是该体系的重要特点，可实现煤炭能源清洁化利用，并在特定条件下实现全流程动态碳中和，为破解煤炭在“双碳”目标要求下的发展难题提供近零排放保障，同时支撑我国能源自主安全可控和经济平稳运行。煤基能源多元技术路径的清洁利用需要实现煤炭利用上下游环节的深度脱碳，并与其他零碳、负碳技术领域耦合发展，形成煤基能源供给侧与需求侧集成优化且低碳、零碳、负碳利用格局，推动煤炭领域的高效降碳。

(二) 高效降碳能力

目前，已实现规模化应用的煤炭清洁转化与利

用技术路径如图10所示，包括煤制油、煤制气、煤制氢和煤制化学品等。该路径中产生碳排放的环节较多，若不结合碳捕集、封存和利用技术，则碳排放量较大，需要关注煤炭转化与利用端的高效降碳。随着新能源技术的发展，构建煤炭与油、气、风、光、水、核等一体化协同发展的全新的煤基能源战略格局，发展以煤基能源为主的多种能源协同优化组合模式，探索煤基能源协同融合发展新路径将成为可能，推动煤与各种新能源技术耦合形成的新型煤基能源体系将具备高效的降碳能力。图11为我国以煤炭为原料制备各种油、气和化学品的碳排放量与国外生产相同物质的对比情况。发达国家已经将煤基能源与生物质能、太阳能和风能等进行了有序

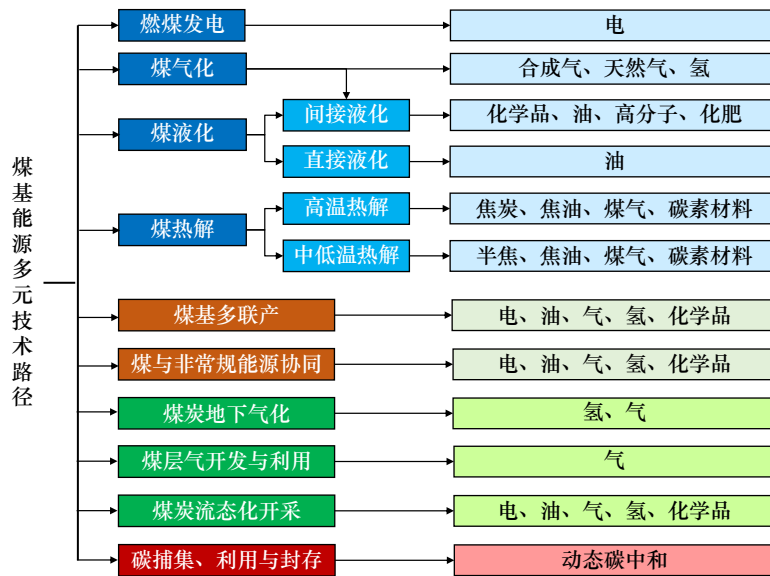


图9 煤基能源多元技术路径谱图

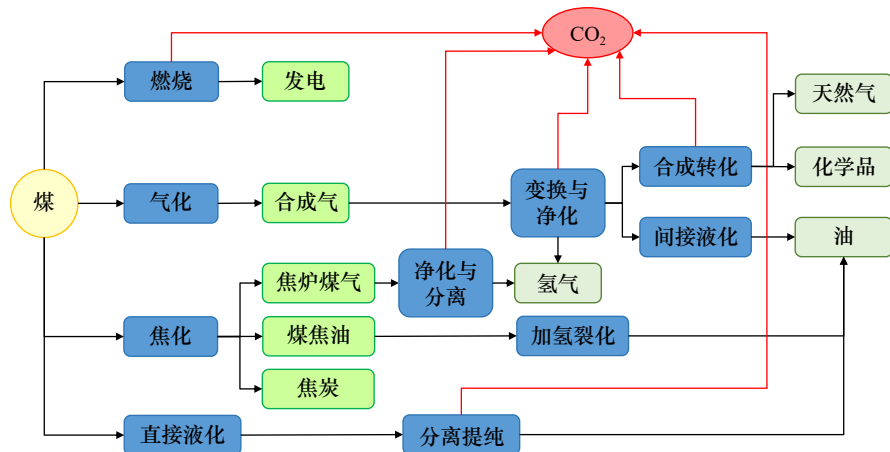


图10 煤炭清洁转化与利用技术路径

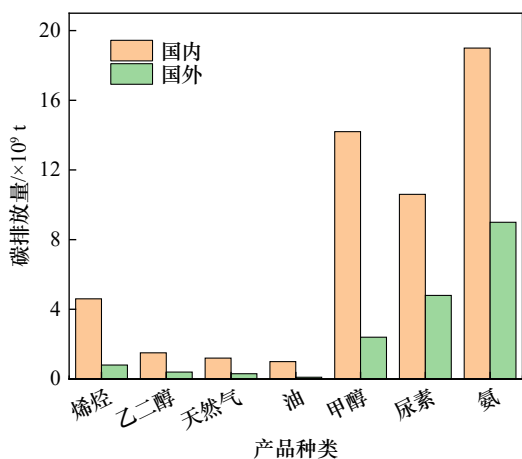


图 11 国内外油气及煤基化学品生产的碳排放量对比

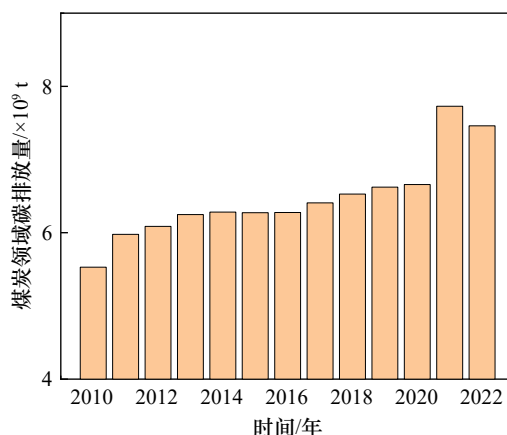


图 12 2010—2022年煤炭领域的碳排放量

耦合，提高了油气资源对煤炭资源的替代比例，从而降低了煤炭转化与利用过程中的碳排放量。

国外侧重使用石油和天然气资源，由于烯烃、乙二醇、天然气、油品和甲醇资源在生产中的碳排放量较低，能源资源的碳排放量明显低于我国；我国以煤为原料来制备烯烃、乙二醇、天然气、油品和甲醇，其碳排放量高于国外的平均水平^[25-27]。虽然碳排放量较高，但煤基能源的技术路径对于保障我国能源和化学品安全、实现能源强国具有重要的现实意义。例如，氨在生产过程中需要高温高压的反应条件且转化率不高，从而使得合成氨及尿素生产行业存在能耗高、碳排放量大等现实问题。目前，我国合成氨和尿素生产仍以煤为主，相比国外积极寻求煤炭与生物质、新能源耦合的技术路径而言，碳排放量维持在较高的水平；未来，随着我国煤基协同能源技术的发展和运用，合成氨和尿素生产领域将具备高效的降碳能力。

另外，立足低碳发展与科技创新路径，我国在煤炭地下气化、富油煤开发利用、煤层气开发利用、纳米碳氢燃料合成应用等前沿技术的突破，以及煤炭流态化开采等颠覆性技术的发展，将为能源安全稳定转型提供技术保障，促进煤炭转化与利用全流程达成降碳、零碳及负碳目标，为能源强国目标下的煤炭领域高效降碳发挥重要作用。

(三) 高效降碳效力分析

按照煤炭领域碳排放量占全国碳排放总量的75%^[7]计算得出，2010—2022年煤炭领域的碳排放量情况（图12）。随着经济快速发展，2010—2021年，

煤炭领域的碳排放量稳步增加，尤其是2021年因国际能源形势和地缘形势的急剧变化，煤炭消费量增加，导致碳排放量增加。未来，随着碳捕集、封存与利用等降碳技术的应用以及煤基低碳能源与技术路径的开发，煤炭领域的碳排放量将呈现降低趋势。

未来较长时期内，煤制油、煤制气、煤制氢、煤炭地下气化和富油煤开发仍是煤炭开发与利用的典型过程，为摸清煤炭的降碳效力，可以根据这些过程的碳排放量进行降碳效力预测分析。将2010—2022年的碳排放数据与煤炭开发利用各过程的碳排放量计算方程^[6,28-30]相结合，面向2060年，对未来我国煤炭领域典型转化与利用技术的碳排放量进行预测，并对其降碳效力进行分析。

由图13可见，随着煤炭清洁、高效和低碳转化技术的发展，煤炭领域典型转化与利用技术的碳排放量均呈下降趋势。2060年，煤炭领域的总体降碳

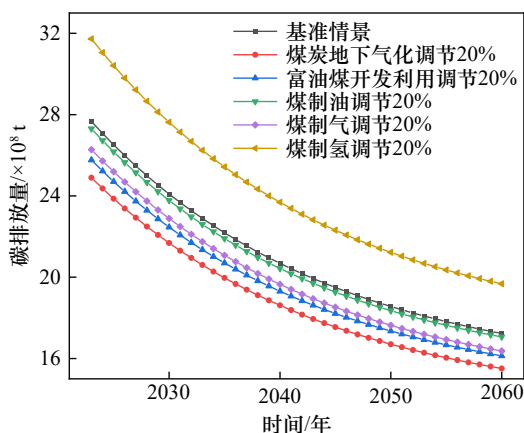


图 13 煤炭领域典型转化与利用技术的碳排放量预测结果

效力约为 1×10^9 t。因各类技术具有不同的降碳效力，以20%的调节变量考查对总降碳效力的影响。预测结果表明，煤炭地下气化技术的降碳效力最优，当其负荷量增至120%时，降碳效力可提升 3×10^8 t；其次是富油煤开发与利用技术，当其负荷上调20%时，降碳效力可提升约 2×10^8 t。煤制氢反应过程中需采用水煤气变换反应来提升氢气的产量，在增加能耗的同时，也增加了碳排放。在煤制氢生产负荷提升至120%时，降碳效力减少了约 4×10^8 t。因此，应积极寻求基于太阳能、生物质能等新能源制氢技术的突破及应用，提升“绿氢”“蓝氢”的产量比例。总体上看，在未来较长时期内，煤炭领域在高效降碳方面仍将发挥积极作用，尤其是以煤炭地下气化、富油煤开发利用等前沿技术的突破与应用，将显著提升煤炭领域的降碳效力。

五、结论与展望

在能源强国目标下，煤炭资源将继续发挥我国能源安全保障的兜底作用，在承担能源保供责任的同时，也将发挥高效降碳的重要作用。本研究剖析了我国煤炭安全保供的潜力、能力和实力，基于系统动力学模型测算了2060年前我国煤炭安全保供的效力；研究分析了煤炭领域高效降碳的潜力和实力，基于煤制油、煤制气、煤制氢、煤炭地下气化和富油煤的开发在内的煤炭清洁高效利用的典型过程，推算了2060年前煤炭领域的高效降碳效力，以期为能源强国目标下煤炭领域的发展规划提供有力的数据支撑。

本研究主要表明：①从我国煤炭的可采储量和资源分布看，我国煤炭领域具有做好能源安全保障的巨大潜力。结合各大煤炭基地的保供情况、近20年的煤炭供应和消费关系可知，我国煤炭资源具备稳定、安全、坚实的保供能力。②根据系统动力学模型的测算结果，我国煤炭资源的安全保供效力在波动中逐渐趋向于平衡，即2060年前随着煤基协同能源技术的发展以及新型煤炭开发利用技术的突破，煤炭资源的安全保供将实现动态平衡。③我国煤炭领域在转化与利用环节中体现出显著的降碳潜力。目前，我国煤制油、煤制气、煤基化学品等过程的碳排放量高于国外的平均水平，但随着我国煤炭地下气化等技术的发展与应用，煤炭领域将展现出较

好的降碳实力。④通过对煤制油、煤制气、煤制氢、煤炭地下气化和富油煤开发利用的碳排放量进行测算后发现，我国煤炭领域在未来仍然具备较强的降碳效力，至2060年，总体的降碳效力将达 1×10^9 t。煤炭地下气化和富油煤开发利用等技术的发展与应用更有利于提升降碳效力。

为实现能源强国目标，需继续坚持煤炭的主体地位不动摇，增强煤炭安全保供的能力。煤炭清洁高效开发利用技术是在“双碳”目标的基本要求下，促使我国能源结构稳定转型和实现能源强国发展的必然选择。因此，要积极构建智能化、绿色化、低碳化、无人化的煤矿开采系统，提高深部煤炭资源的勘探精度，高效率、高精度、高智能地实现深部煤炭资源及煤层气、稀土金属等附属资源的开发利用，打造高效率、高品质、高循环的煤炭开发与利用一体化集成系统平台，加快突破深部煤炭资源原位开采和转化的颠覆性技术，继续发展大规模碳捕集、利用与封存技术，围绕煤炭开发利用全过程中的碳排放，有针对性地部署高效降碳和除碳技术应用，统筹规划并分阶段部署大规模碳捕集、利用与封存工程示范项目，加速零碳及负碳的煤炭原位地下流态化开采、二氧化碳原位封存等颠覆性技术突破及示范，为实现能源强国的目标提供技术保障。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 6, 2024; **Revised date:** April 8, 2024

Corresponding author: Liu Jinchang is an associate professor from the School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing. His major research field is clean and efficient utilization of coal. E-mail: liujinchang@cumtb.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on Promoting the Construction of Energy Power” (2022-PP-03), “Research on the Scientific System and Strategic Path of Carbon Neutral Development in China’s Coal Industry” (2022-XBZD-09), “Research on China’s Energy Security Strategy” (2022-JB-05), “Research on China’s High Quality Development Strategy and Prospective Technology System” (2023-JB-08)

参考文献

- [1] 周守为, 朱军龙, 李清平, 等. 科学稳妥实现“双碳”目标, 积极推进能源强国建设[J]. 天然气工业, 2022, 42(12): 1–11.
Zhou S W, Zhu J L, Li Q P, et al. Scientifically and prudently achieving the goals of peak carbon emissions and carbon neutrality, actively promoting the construction of an energy power [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(12): 1–11.

- [2] 刘捷先. 基于 ESG 理念的碳信息披露质量对企业价值创造的影响机制研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学(博士学位论文), 2022.
Liu J X. Research on the influence mechanism of carbon information disclosure quality on enterprise value creation based on ESG concept [D]. Hefei: Hefei University of Technology (Doctoral dissertation), 2022.
- [3] 郝宇. 新型能源体系的重要意义和构建路径 [J]. 人民论坛, 2022 (21): 34–37.
Hao Y. Significance and construction path of new energy system [J]. People's Tribune, 2022 (21): 34–37.
- [4] 刘满平. 能源政治化趋强风险下我国的策略应对 [J]. 当代石油石化, 2023, 31(12): 1–4.
Liu M P. China's strategic response to the risk of energy politicization [J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2023, 31(12): 1–4.
- [5] 昌灏, 黄玉婷. 习近平能源革命重要论述的理论阐释与实践遵循 [J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2024, 40(01): 79–85.
Chang H, Huang Y T. Theoretical interpretation and practical guidance of Xi Jinping's important statements of energy revolution [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences), 2024, 40(1): 79–85.
- [6] 葛世荣, 王兵, 冯豪豪, 等. 煤基能源动态碳中和模式及其保供降碳效益评估 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 122–135.
Ge S R, Wang B, Feng H H, et al. Dynamic carbon neutrality mode for coal-based energy systems and effectiveness assessment thereof [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(5): 122–135.
- [7] 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1–15.
Liu F, Guo L F, Zhao L Z. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1–15.
- [8] 中国经济网. 2023 年中国能源消费总量 57.2 亿吨标准煤, 比上年增长 5.7% [EB/OL]. (2024-02-29)[2024-03-03]. http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202402/29/t20240229_38916543.shtml.
China Economic Net. China's total energy consumption in 2023 will be 5.72 billion tons of standard coal, an increase of 5.7% over the previous year [EB/OL]. (2024-02-29)[2024-03-03]. http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202402/29/t20240229_38916543.shtml.
- [9] 黄震, 谢晓敏, 张庭婷. “双碳”背景下我国中长期能源需求预测与转型路径研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 8–18.
Huang Z, Xie X M, Zhang T T. Medium-and long-term energy demand of China and energy transition pathway toward carbon neutrality [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 8–18.
- [10] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2023 [M]. 北京: 地质出版社, 2023.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China mineral Resources 2023 [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2023.
- [11] 李军, 乔中鹏, 刘治中, 等. 煤炭资源开发管理现状分析及对策建议 [J]. 中国煤炭, 2023, 49(9): 1–6.
Li J, Qiao Z P, Liu Z Z, et al. Current situation analysis and proposed countermeasures of coal resource development and management [J]. China Coal, 2023, 49(9): 1–6.
- [12] 桑玉珊. 煤炭运输运营模式及经营对策研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学(硕士学位论文), 2015.
Sang Y S. Study on operation mode and management suggestions of coal transportation [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University (Master's thesis), 2015.
- [13] 王双明, 王虹, 任世华, 等. 西部地区富油煤开发利用潜力分析和体系构想 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 49–57.
Wang S M, Wang H, Ren S H, et al. Potential analysis and technical conception of exploitation and utilization of tar-rich coal in Western China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 49–57.
- [14] 张宏. 当前煤炭宏观经济形势分析 [J]. 中国煤炭工业, 2020 (7): 30–33.
Zhang H. Analysis of the current macroeconomic situation of coal industry [J]. China Coal Industry, 2020 (7): 30–33.
- [15] 葛世荣, 樊静丽, 刘淑琴, 等. 低碳化现代煤基能源技术体系及开发战略 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 203–223.
Ge S R, Fan J L, Liu S Q, et al. Low carbon modern coal-based energy technology system and development strategy [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 203–223.
- [16] 王其藩. 系统动力学(修订版) [M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2009.
Wang Q F. System dynamic [M]. Shanghai: Shanghai University of Finance & Economics Press, 2009.
- [17] 李君清, 李寅琪. 煤炭产业经济走势及煤炭企业对策研究 [J]. 中国煤炭, 2023, 49(3): 16–22.
Li J Q, Li Y Q. Study on the development trend of coal industry economy and countermeasures of coal enterprises [J]. China Coal, 2023, 49(3): 16–22.
- [18] 王金刚, 陈昊宇. 全国统一大市场背景下煤炭保供体系数字化转型研究 [J]. 煤炭经济研究, 2023, 43(7): 34–39.
Wang J G, Chen H Y. Research on digital transformation of coal supply guarantee system under the background of national unified large market [J]. Coal Economic Research, 2023, 43(7): 34–39.
- [19] 宋晓波. 后俄乌冲突时代我国煤炭产业绿色发展策略研究 [J]. 中国煤炭, 2023, 49(9): 15–22.
Song X B. Research on the green development strategy of China's coal industry in the post Russia-Ukraine conflict era [J]. China Coal, 2023, 49(9): 15–22.
- [20] 程晓强, 崔峰, 陈建强, 等. 基于系统动力学的煤矿投入管理仿真分析 [J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(6): 124–130.
Cheng X Q, Cui F, Chen J Q, et al. Simulation analysis of coal mine input management based on system dynamics [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(6): 124–130.
- [21] 任世华, 谢亚辰, 焦小淼, 等. 煤炭开发过程碳排放特征及碳中和发展的技术途径 [J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 60–68.
Ren S H, Xie Y C, Jiao X M, et al. Characteristics of carbon emissions during coal development and technical approaches for carbon neutral development [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 60–68.
- [22] 袁亮. 煤炭工业碳中和发展战略构想 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 103–110.
Yuan L. Strategic conception of carbon neutralization in coal industry [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(5): 103–110.
- [23] 刘中民. 现代煤化工是煤炭清洁高效利用重要途径 [J]. 中国石油企业, 2023 (6): 10.
Liu Z M. Modern coal chemical industry is an important way for clean and efficient utilization of coal [J]. China Petroleum Enter-

- prise, 2023 (6): 10.
- [24] 潘月军. 新形势下我国煤炭资源高效清洁利用途径分析 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 807–809.
- Pan Y J. Analysis on the approaches of efficient and clean utilization of China's coal resources under the new situation [J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 807–809.
- [25] Zhang Y, Yuan Z W, Margni M, et al. Intensive carbon dioxide emission of coal chemical industry in China [J]. Applied Energy, 2019, 236: 540–550.
- [26] Liu Y, Qian Y, Xiao H H, et al. Techno-economic and environmental analysis of coal-based synthetic natural gas process in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166: 417–424.
- [27] Yi Q, Wu G S, Gong M H, et al. A feasibility study for CO₂ re-cycle assistance with coke oven gas to synthetic natural gas [J]. Applied Energy, 2017, 193: 149–161.
- [28] Liu H, Liu S Q. Life cycle energy consumption and GHG emissions of hydrogen production from underground coal gasification in comparison with surface coal gasification [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(14): 9630–9643.
- [29] 张源, 顾斌, 周长冰, 等. 煤炭地下气化过程产气特征数值模拟研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(6): 1169–1176.
- Zhang Y, Gu B, Zhou C B, et al. Numerical simulation on gas production characteristics during underground coal gasification [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(6): 1169–1176.
- [30] Li J J, Cheng W J. Comparative life cycle energy consumption, carbon emissions and economic costs of hydrogen production from coke oven gas and coal gasification [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(51): 27979–27993.